

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0599

古建筑基座渗漏监测及诱因分析

朱才辉, 郭炳煊

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 为研究某古建筑基座渗漏特征及其诱因, 采用现场调研、水分场原位监测、室内试验和数值分析方法, 针对基座水分场开展了系统研究, 深入分析了基座渗漏病害根源、降雨期间基座内部水分场的时空分布特征和水分迁移规律。结果表明, 古建筑基座渗漏的根源是降雨影响, 与基座外侧的花坛浇灌用水无关, 基座顶部以下 2.0 m 范围内易于受到降雨的影响, 且水分有由基座顶部向基座底部迁移趋势, 揭示出: 基座顶部的海墁以下防渗层可能失效, 基座内部夯土可能形成渗流通道; 在 2 个水文年内, 基座外墙以内的 3.0 m 范围内夯土基本达到饱和, 易受到降雨影响而出现泛碱、掉皮、渗漏等现象, 10 个水文年后水分向基座券门拱圈部位夯土迁移, 并形成稳定水分场, 在渗透压力下券门拱圈部位形成流痕和墙皮脱落现象; 通过多手段综合分析, 能够深入了解基座病害的演化规律和形成机制, 为类似古建筑基座的防渗漏修复措施的确定能够提供科学的参考。

关键词: 古建筑基座; 渗漏病害调研; 水分场; 降雨入渗

中图分类号: K 928.71

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)11-4210-08

Monitoring and inducement analysis of seepage of an ancient building base

ZHU Cai-hui, GUO Bing-xuan

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: To investigate the water seepage characteristics and formation mechanism in an ancient building base (ABB), site investigation, in situ monitoring, laboratory test and numerical methods are employed to study the water field in an ABB. The causes of water seepage, spatial-temporal distribution and migration of water during the rainfall are analyzed in detail. The research results show that the causes of water seepage of the ABB are rainfall infiltration rather than plants irrigation. The rainfall has a greater influence on 2.0 m depth rammed soil underneath the base top than the influence at the other positions, and the water has a tendency to migrate from the base top to base bottom. It is indicated that the impervious layer has been in disrepair for long years and the leakage pathway in the rammed soil has been generated. During 2 hydrological years, 3.0 m depth rammed soil adjacent to the side wall of ABB was saturated and was easily influenced by the rainfall infiltration, which caused bloom of the crystalline materials and occurrence of peeling and water seepage. After 10 hydrological years, the water migrated from the base top to the crown of city-gate, and water seepage and peeling happened. The evolution law and formation mechanism of water seepage hazards are analyzed in details through different approaches, and the results can provide scientific base for seepage prevention and restoration measures of the ABB.

Keywords: ancient building base; seepage hazard investigation; water field; rainfall infiltration

1 引 言

中国历史上年代久远、保存完好的古建筑遗留下来的不多, 该类建筑其承接上部本体结构和夯土地基的基座多采“外砖芯土”的结构形式, 上部结构的稳定性由基座的安全稳定性能所控制, 调查发现, 大部分古建筑基座存在较为严峻的渗漏病害及其因渗漏引起的附加病害问题, 以西安钟楼、鼓楼、

古城墙为例, 如图 1 所示, 外墙出现大面积泛碱、掉皮(块)、开裂, 甚至诱发上部结构出现移位、倾斜等都与渗漏病害有关。对于古建筑结构的病害及机制问题研究成果较多, 常用的研究方法有物理模型试验、室内试验、原位监测和数值方法等。文献[1-3]针对古建筑材料的结构力学性质开展了试验研究、文献[4-7]从古建筑材料的风化、劣化角度探索了古遗址的病害诱因及其修复措施。文献[8-10]

收稿日期: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51678484); 陕西省黄土力学与工程重点实验室科研计划项目(No. 16JS073)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of China (51678484) and Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering (16JS073).

第一作者简介: 朱才辉, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事地下洞室、岩土工程数值模拟等方面的研究工作。E-mail: zhucaihui123@163.com

从物理-化学等微、细观角度来研究古遗址、建筑材料的相关特性，文献[9, 11-12]基于电磁波、红外线等无损探测理论来研究古建筑材料内部的劣化及水分场分布特征，这为古建筑的破坏机制提供了极为宝贵的研究思路和方法，但针对古建筑基座的渗漏病害的长期原位监测研究及其形成机制报道较少。此外，古建筑基座中的“芯墙夯土”在历经上百年的雨水入渗和冲刷后，会使其强度、承载力降低，从而进一步影响古建筑上部结构的长期稳定性^[5-7]，但上述针对古建筑基座夯土结构其内部水分在外部“水环境”变化期间的渗透演化规律的研究报道则很少。

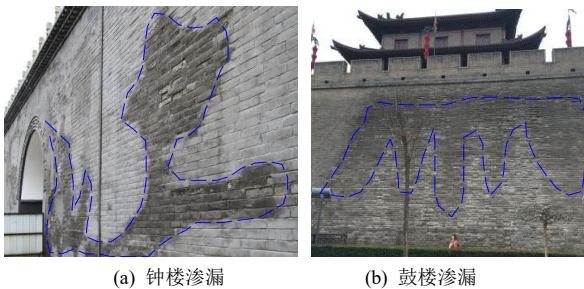


图 1 古建筑基座水害实况（拍摄于西安）

Fig.1 Water hazards of ABB (Photo by author in Xi'an)

鉴于此，本文以西安某古建筑基座出现的病害为研究对象，开展渗漏病害及水文信息原位调研工作，并在基座内部和基座的天然地基中布设微型 TDR (time domain reflector) 土壤水分计等原位监测系统来探测基座内部水分场的时空变化规律问题，通过钻孔取样来获取基座内部夯土的土-水特征曲线及渗透特征，并基于数值分析方法系统地研究古建筑基座在降雨入渗条件下的长期渗漏规律及空间分布，这对后期的病害防治措施的制定具有重要的工程实际意义。

2 基座渗漏病害分布规律分析

2.1 基座渗漏病害调研

以往研究表明，砌体-芯墙结构的古建筑病害都是由于“水”的作用引起，其主要体现在砌体外墙的渗漏水、泛碱、起皮掉渣、风化剥蚀及内部可能存在的空洞、掏蚀、渗流通道、开裂甚至坍塌等^[7]，以 13 朝古都西安的在役古建筑为背景，详细调查了其水害发生的位置及规模，以下为该古建筑基座西、南侧外墙病害情形，如图 2、3 所示。

东西南北四面侧墙的病害类型及病害的规模统计结果如图 4 及表 1 所示。说明：仅有渗水(A)，仅有泛碱(B)，仅有起皮掉渣(C)，渗水和泛碱病害同时发生(A+B)，渗水和起皮掉渣病害同时



图 2 基座西侧外墙水害分布

Fig.2 Water hazards distribution of west side wall

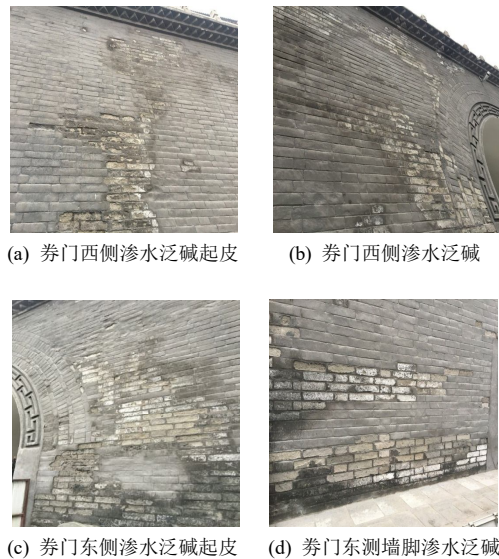


图 3 基座南侧外墙病害分布

Fig.3 Water hazards distribution of south side wall

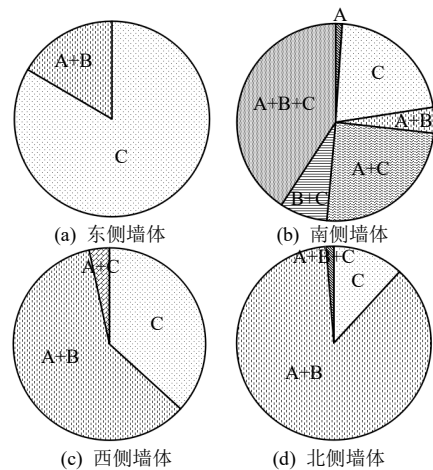


图 4 古建筑基座 4 个外墙表面的病害分布

Fig.4 Water hazards distribution of four side-walls of ABB

表1 外墙病害统计结果

Table 1 Water hazards statistic results of side wall of ABB

病害类型	长度 /m	宽度 /m	面积 /m ²	比例 /%
A	1.5	0.5	0.8	0.1
B	0.0	0.0	0.0	0.0
C	88.0	43.9	81.5	6.7
A+B	77.0	65.9	117.5	9.6
A+C	15.3	7.3	19.6	1.6
B+C	3.8	2.9	5.4	0.4
A+B+C	17.8	9.1	29.1	2.4

发生(A+C), 渗水、泛碱和起皮掉渣3种病害同时发生(A+B+C)。根据上述现场调研结果可知:

(1) 由图4可知, 西和北侧的渗水、泛碱病害程度相对于其他侧墙较严重, 东、西侧墙的起皮掉渣现象最为严重, 南侧墙的3种病害同时存在, 其受到渗漏影响程度最为严重; 由表1可知, 古建筑基座外墙的渗水病害主要集中在顶部向下3 m及地面以上2 m的范围内, 四面外墙由于渗漏引起的病害主要包括: 渗水、泛碱、起皮掉渣等, 其中渗水泛碱现象最为严重, 占外墙总面积的9.6%; 起皮掉渣的病害面积次之, 约占6.7%, 3种病害同时存在的占2.4%。

(2) 整体分析表明, 古建筑基座外墙的渗漏病害分布不均, 单纯的渗漏病害较少(0.1%), 而墙面泛碱、起皮掉渣等现象均与渗漏水有关, 因渗漏及其引起的附加病害占基座外墙总面积的20.8%, 可见, 古建筑基座的渗漏病害问题比较突出, 需引起保护单位的重视。此外, 尚需更进一步探索其病害的诱因、形成机制, 为后期渗漏病害的防治提供科学参考。

2.2 降雨及花坛浇灌对古建筑渗漏病害影响

为了进一步了解古建筑基座渗漏的水分来源, 开展了现场水源调研和水文信息监测工作。古建筑基座的排水系统有如下设施组成: 基座外墙以内约1.5 m深度处的内置落水水管(编号A'~H'), 基座外侧花坛周边的8个集水槽(编号1~8)和联结落水水管及外侧集水槽的8条下埋式水平引水管, 如图5所示。

现场的长期观察可见, 每逢大雨或暴雨之后, 基座顶部4个角落部位(A'C'、B'D'、E'G'、H'F'交汇处)总会出现严重积水现象, 局部瞬间积水深达10 cm, 表明基座的排水系统和顶部的排水坡度存在隐患, 为了进一步评价降雨之后基座排水系统的工作效能, 在大雨或暴雨期间, 采用流量计、雨量计等相关监测设备针对临近基座的水文信息进行监测。在大雨和基座外侧花坛浇灌期间, 连续监

测30 min内的降雨量和花洒浇灌量, 降雨期间, 同时监测1~8个集水槽和基座顶部海墁上的积水量。

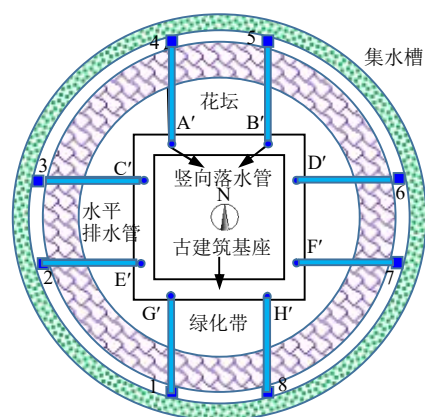


图5 古建筑基座排水系统布置示意图
Fig.5 Arrangement of drainage system of ABB

经过水文分析可得到如下结论:

(1) 前10 min内降雨量为4.61 mm, 第2个10 min内降雨量为2.30 mm, 第3个10 min内降雨量为0.55 mm, 且15 min内1~8号的集水槽在降雨和水平排水管道排水期间集满, 经计算集水槽内因降雨产生的积水量 $Q_1 = 0.008 \text{ m}^3$; 因海墁顶部降雨, 流经落水管和水平排水管到达集水槽, 并在水平排水管内聚集的总排水流量 $Q_2 = 6.011 \text{ m}^3$; 同时海墁顶部平均积水量达 $Q_3 = 0.621 \text{ m}^3$, 而此时基座顶部总降雨量 $Q = 7.26 \text{ m}^3$, 则剩余的雨量则主要是蒸发、损失和渗入到基座内部的夯土中, 如果不考虑蒸发损失, 则基座的最大入渗量占降雨总量的8.5%, 排水系统的排水效能保持较好, 由此可见: 基座的原防排水系统工作效能保持较好, 但海墁顶部防水层失效和排水坡度不合理导致的渗水问题不容小觑。

(2) 古建筑基座外侧的环形花坛内均匀分布了36个喷头, 每个喷头的浇灌量约为 $15.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 。浇灌用水主要被土壤和花卉吸收, 部分多余的水分形成径流和蒸发, 可能有部分径流会向基座下部的夯土地基中入渗, 然而基座外侧花坛下部的天然地面已采取厚约1.0 m的地砖、防渗沥青和混凝土等材料进行了硬化处理, 径流水分难以入渗, 且枯水期(花坛浇灌最频繁时段)地下水位呈下降趋势, 这一点在后文的基座外侧地基内体积含水率和地下水位的变化规律监测结果可证实。以上仅采取水文调查方法对基座的入渗问题进行了初步探索, 为了更深入地了解基座内部夯土在降雨、花坛浇灌前后的水分迁移规律和空间分布规律, 需要在基座内部布设监

测点进行分析。

3 基座内水分迁移规律及诱因分析

将自行研制的微型 TDR 土壤水分传感器探头分别埋置在基座顶部以下 1.0~4.0 m 深度处的夯土层中，基座券门以下 0.5~1.0 m 深度的地基内部，外墙以内深约 1.0~2.0 m 的夯土层中及明显出现水害的部位及基座外侧天然地基内部，布置完成后夯筑密实，并对孔口进行复原和封堵，防治雨水渗入。其监测系统布置如图 6(a)所示，监测结果如图 6(b)、

6(c)、6(d)、6(e)所示，图 6(f)为 1985 年地质勘察期间测得的基座内部夯土层体积含水率随深度的变化规律^[13]。

通过上述在基座不同位置处布设的 TDR 水分计测得的体积含水率随时间的变化过程可知：

(1)由图 6(b)可知，基座顶部以下 4.0 m 内($h_1 \sim h_3$)的平均含水率约为 22.6%，顶部以下 2.0 m 深度内夯土层受降雨(7~9 月)影响明显，在降雨前后其体积含水率波动幅度为 $\pm 1\% \sim 2\%$ ，枯水期(第 1 年 10 月~第 2 年 3 月)含水率亦呈下降趋势，表

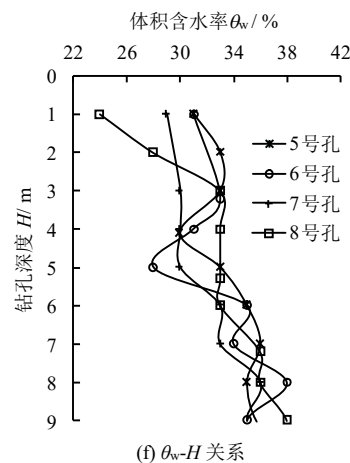
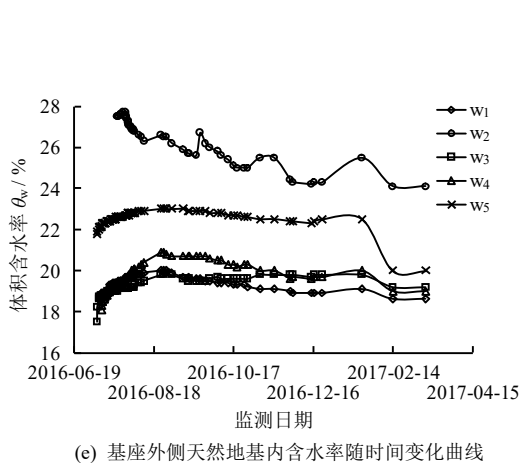
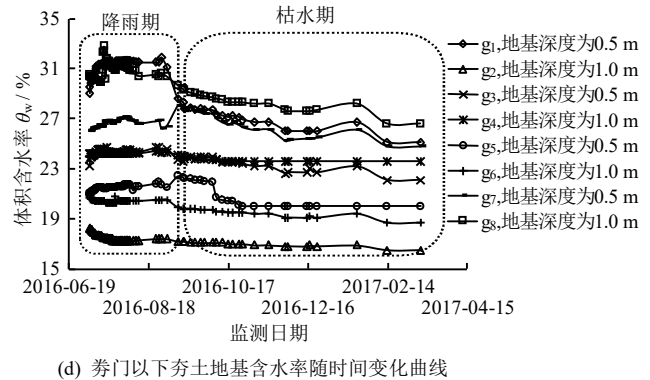
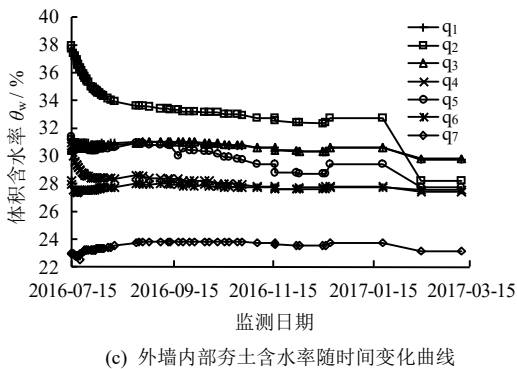
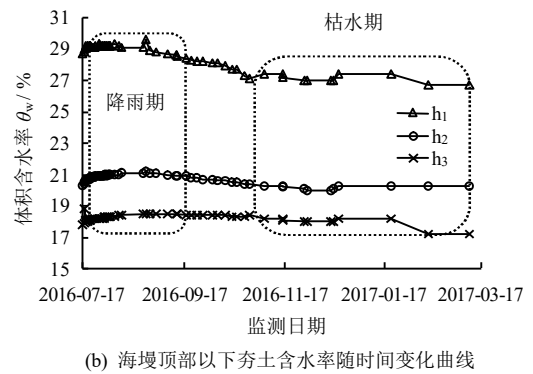
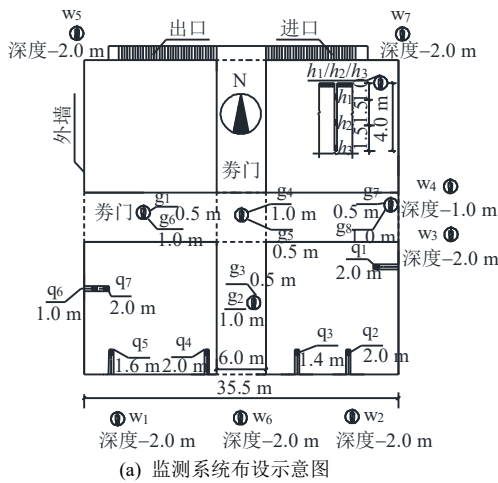


图 6 古建筑基座及地基内部含水率分布
Fig.6 Water content distributions of ABB and foundation

明入渗的水分有向基座下部迁移的趋势,这与降雨期间券门拱圈出现大面积线状渗漏水现象吻合。可见,基座顶部的海墁以下防渗层可能发生劣化渗漏。

(2)由图 6(c)可知,外墙内部夯土层($q_1 \sim q_7$)的含水率整体呈下降趋势,枯水期下降幅度最大达 6%,而在降雨期下降速率相对缓慢,但局部由于雨水沿着外墙裂缝向内入渗致使其内部夯土含水率略有上升趋势(q_7),基座底部水分含率(平均 29.5%)整体较基座顶部(22.6%)偏大。由图 6(f)对比可知,32 年前地质勘察结果显示,基座上部 1.0~4.0 m 内的整体含水率(30.7%)明显低于基座底部 5.0~9.0 m 的含水率(36.0%),进一步证实了长期以来(自 600 余年前兴建以来)基座上部水分逐渐向下部的券门及外墙附近迁移和聚集,从而造成后期每逢降雨期间,在基座券门内部出现掉皮、线状渗漏和外墙渗漏病害等现象。

(3)由图 6(d)可知,在雨期,券门下地基深度 0.5 m 处(g_1 、 g_3 、 g_5 、 g_7)土体的含水率波动幅度约为 $\pm 2\%$,枯水期几乎不变,而其下部深度 1.0 m 处(g_2 、 g_4 、 g_6 、 g_8)地基土的含水率却呈下降趋势,这可能是由于券门下表层(0.5 m)地基土受到基座顶部降雨渗漏的水分在底部聚集造成。此外,废水、污水的排放导致地基表层湿度变化等,而其下层地基土不受降雨和“水环境”变化的影响;由图 6(e)可知,基座外侧地基土在雨期(7~9月)的含水率略有上升或波动,但在枯水期(恰好是绿化需要补水,花坛浇灌最为频繁的时期,第 1 年 10 月~第 2 年 3 月)反而呈逐渐下降趋势,可推测:花坛浇灌产流难以入渗至古建筑基座底部的地基土中,不会对基座内部夯土的湿化产生影响。

4 基座水分场渗流特性分析

4.1 基座夯土层土水特征

根据基座内部夯土地质勘察资料可知^[13],夯土层的干密度变化范围为 1.4~1.7 g/cm³,其平均干密度 $\rho_d = 1.53 \text{ g/cm}^3$ (如图 7(a)所示),由顶部至底部分布不均,压缩系数呈减小趋势(如图 7(b)所示)。

为便于深入分析基座夯土层在降雨条件下的渗透特性,需针对非饱和压实黄土的土-水特征曲线进行相关室内试验,选取具有历史年代的基座外侧下部深度为 3.0 m 的夯土地基进行钻孔取样,针对平均干密度的重塑压实黄土,在非饱和试验仪上对平行试样进行无应力状态下的土-水特征曲线测试,然后采用 Van Genuchten^[14]提出的 V-G 模型来拟合夯土土-水特征曲线:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\psi/a)^n\right]^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)}} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率(%); θ_s 为土壤饱和体积含水率(%); θ_r 为残余体积含水率(%); ψ 为基质吸力(kPa);参数 a 是与进气值有关的参数(kPa);参数 n 与基质吸力大于进气值范围内与土脱水速率有关的土参数。可得夯土参数如表 2 所示。

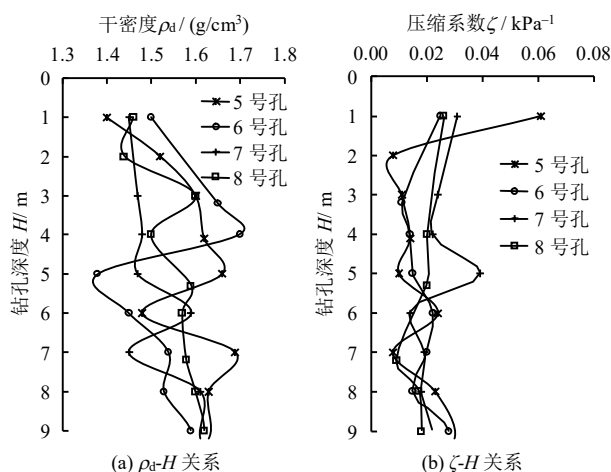


图 7 基座内部夯土物理力学参数分布规律

Fig.7 Physical and mechanical parameters of rammed soil

表 2 夯土 V-G 模型参数

Table 2 V-G model parameters of rammed soil

土层名称	k_s /(10 ⁻⁸ m/s)	θ_s /%	θ_r /%	ζ /(10 ⁻⁴ kPa)	a /kPa	n
夯土	8.58	52.0	7.8	1.84	28.87	2
砌体结构	7.56	18.5	2.8	/	/	/
地砖	0.39	19.0	2.9	/	/	/
止水帷幕	86.80	8.0	1.2	/	/	/
主体结构	98.40	6.0	0.9	/	/	/

注: k_s 为饱和渗透系数, ζ 为压缩系数。

4.2 降雨入渗对基座影响分析

根据前期地质勘探结果^[13],可得到基座内各层土质厚度及类型为:①基座海墁表面至 0.4 m 为混凝土表面,深度 0.3~0.5 m 为城砖;②深度 1.0~25.0 m 为压实黄土(夯土);③基座外侧地基表面以下深度 1.0 m 厚为素混凝土及沥青防渗层;④基座外地基下深 1.0~3.5 m 不等的灰土;⑤基座外地基 4.0~10.0 m 的夯土层;⑥基座外 10.0~20.5 m 之间以黄土状-亚黏土为主,含有大量砖瓦碎块、碳渣、石灰渣、木炭屑及骨头,土质不均匀;⑦距离基座外侧约 7.5 m 宽度处为长度为 40 m 的防渗帷幕结构(混凝土钻孔灌注桩)。本文采用 GeoStudio 建立有限元渗流模型,共计 2 034 个单元、2 270 个节点,有限元网格及材料特性如图 8 所示。

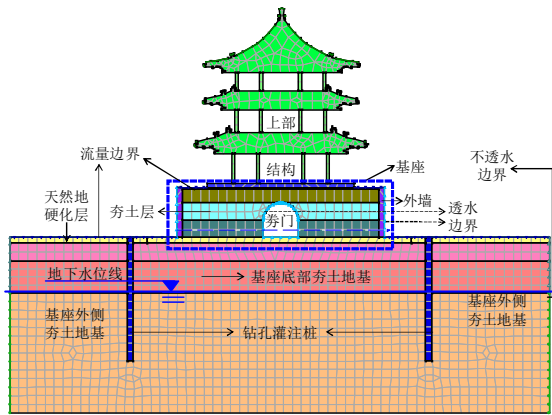
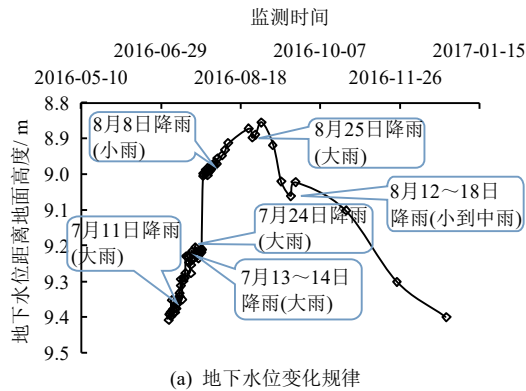
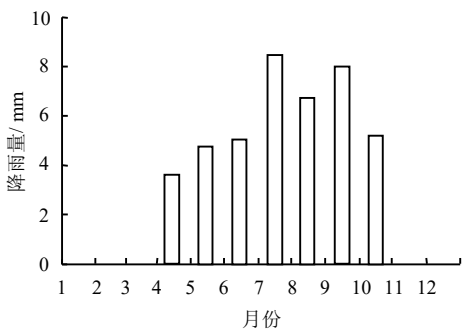


图 8 有限元模型及网格图
ig.8 Mesh regions and finite element model

本研究对象古建筑自建立至今约 630 年历史，假定 600 年来陕西地区的降雨规律不发生较大变化，以近 60 水文年来的年平均降雨规律为标准，根据西安地区近 60 水文年内的月平均降雨量统计资料显示^[15]，年降雨量为 507.7~719.8 mm/a，且年总降雨略呈下降趋势，年平均降雨量为 614.6 mm，60 水文年来共有 5 965.7 d 降雨（约为 16 a），占总年份 27%，根据现场钻孔量测地下水位线的变化规律（如图 9(a)所示）可知，地下水位基本稳定在地表以下 9.2 m，雨期和枯水期变化幅度为±0.3 m。拟定一个标准水文内的降雨量，如图 9(b)所示。



(a) 地下水水位变化规律



(a) 标准水文年内月平均降雨量分布

图 9 渗流分析边界条件

Fig.9 Boundary conditions of seepage analysis

由图 9 可见，西安市每年的 11 月至第 2 年的 3 月份期间 5 个月的降雨量较少，可忽略不计。4 月~10 月份降雨量比较集中，其中 7 月~9 月为全年雨期最集中的时段，以此降雨周期作为 1 个水文年降雨边界条件进行降雨入渗模拟，降雨边界条件如下：由于基座上部结构为屋盖，设定为不透水边界，基座顶部外侧、外墙及天然地面视为透水边界，地基左右两侧设定为半无限条件，视为不透水边界，所有透水边界均按照降雨流量边界设定，按照图 9 施加流量边界，模拟 1 个水文年内降雨及历经 600 年之内的降雨期和枯水期，则古建筑基座的渗流分析结果如图 10、11 所示。

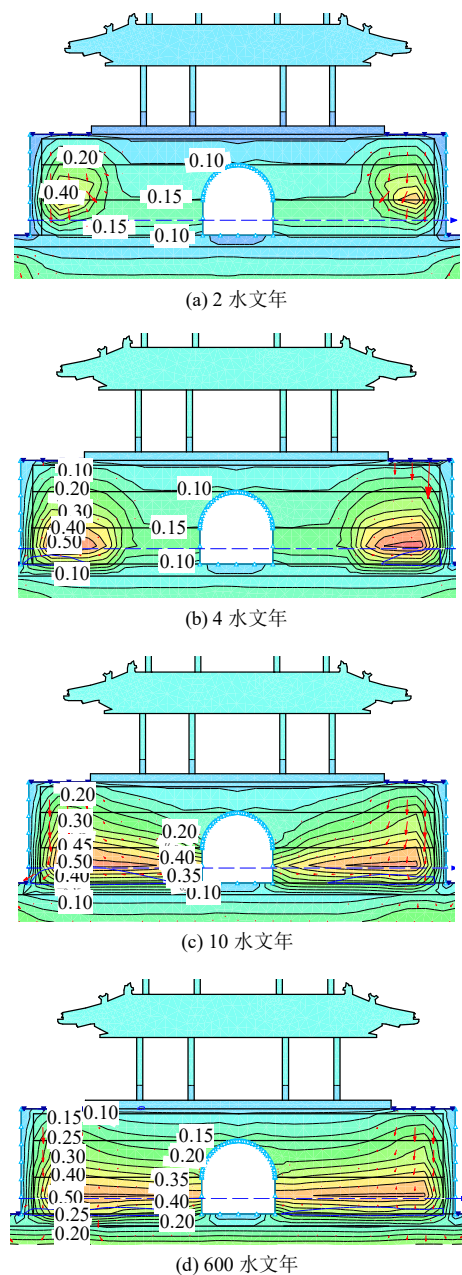
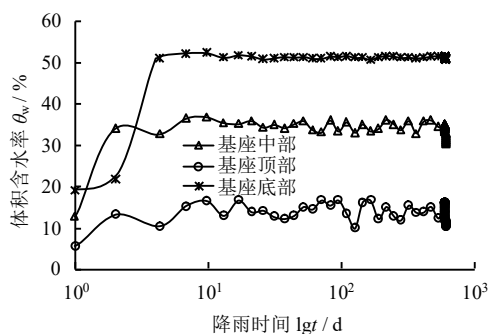
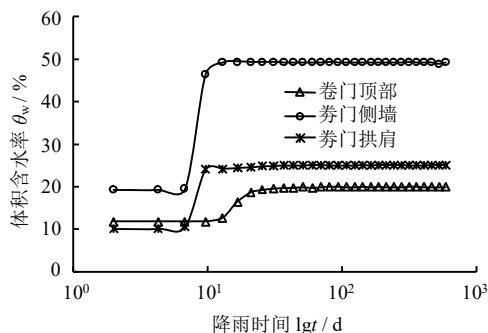


图 10 不同降雨历时下基座体积含水率分布规律

Fig.10 Volume water content distributions of ABB during different rainfall stages



(a) 古建筑基座不同位置水分随时间变化规律



(b) 基座券门不同部位水分随时间变化规律

图 11 基座不同位置处水分场随时间变化规律

Fig.11 Water variations of ABB during different stages

根据上述针对古建筑基座在降雨状态下的渗流特性数值模拟结果可得到如下结论:

(1) 图 10 为不同水文年期间(降雨期和枯水期),从历时 2、4、10、600 个水文年后的基座水分场对比可知,2 个水文年内,降雨由基座顶部入渗至基座中部,4 个水文年内降雨入渗至基座底部,主要表现为:竖向下渗和向外侧墙水平入渗,当超过 10 个水文年以后,基座内部水分逐渐向券门拱圈部位迁移,在历时 600 个水文年之后,基座底部临近外墙部位的水分基本达到饱和,券门侧墙及拱圈部位的渗流基本贯通,最终水分场在整个基座内部表现为以券门为中心的“漏斗”形状,而漏斗核心部位券门成为天然的渗漏通道,这与现场所显示的券门拱圈部位和外墙部位渗漏病害基本相符。

(2) 图 11(a)、11(b)分别展示了基座拱圈附近和靠近外墙的基座内部夯土的体积含水率随历时变化规律,临近外墙部位的夯土层在历时 2 个水文年之后,水分已由基座顶部入渗至底部,水分场基本达到稳定,随后有微弱的波动,但总体上看,从顶部到底部的水分含量基本呈减小趋势;对于基座券门附近的夯土而言,水分入渗需历经约 10 个水文年后能达到稳定状态,且券门顶部至侧墙底部的水分也呈逐渐减小趋势,综上表明:水分有从基座顶部向基座底部逐渐迁移的趋势,这与基座内部水分场的

长期监测结果演化规律基本一致。

(3) 临近外墙的夯土层水分场受降雨影响存在较大的波动,而临近券门附近的水分场基本维持不变,因而,基座外墙部位受到干湿、冻融循环的影响更大,现场观测出现的风化、泛碱掉皮、渗漏等病害可证实;由于历经上百个水文年的入渗,基座中心部位的渗流通道已基本形成,而夯土的渗透系数极低(如表 2 所示),入渗的水分又难以排出,从而导致夯土水分场已基本达到动态的稳定,当多余的水分继续下渗时,便经由已形成的入渗通道向券门拱圈部位渗漏,在渗透压力下券门拱圈部位形成线性状流痕和墙皮脱落现象。

5 结 论

(1) 古建筑基座的渗漏病害主要是由降雨入渗引起,基座外侧的花卉、绿化浇灌对基座的渗漏病害无影响,外墙砌体因渗漏产生的附加病害占总面积的 20.8%;基座内部水分场监测结果显示,基座顶部以下 2.0 m 范围内易于受到降雨的影响,且水分有由基座顶部向基座底部迁移趋势,揭示出:基座顶部的海墁以下防渗层可能发生劣化失效,基座内部夯土出现湿化变形,形成了渗流通道;

(2) 渗流数值分析表明,在 2 个水文年内,基座外墙以内 3.0 m 范围内的夯土基本达到饱和,基座外墙部位更易于受到干湿、冻融循环的影响而出现泛碱、掉皮、渗漏等现象,10 个水文年后基座底部和券门侧墙附近的夯土水分渐趋饱和,且形成稳定水分场。在降雨渗透压力下,券门拱圈和侧墙部位形成线性状流痕和墙皮脱落现象,这与实际观测到的现象基本一致。

(3) 通过对古建筑基座病害的调研、原位监测和数值模拟综合分析,能够深入了解基座病害的演化规律和形成机制,能够为类似古建筑基座的防渗漏修复措施提供科学的参考。

参 考 文 献

- [1] 郑山锁,商效瑛,张奎,等.冻融循环作用后再生混凝土砖墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(3):64-70.
ZHENG Shan-suo, SHANG Xiao-yu, ZHANG Kui, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled concrete brick walls under freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(3): 64-70.
- [2] 赵海英,汪稔,李最雄,等.战国秦时期夯土长城加固强度试验研究[J].岩土力学,2007,28(增刊):79-84.

- ZHAO Hai-ying, WANG Ren, LI Zui-xiong, et al. Tentative research on the consolidated Great Wall of Qin Dynasty at the Warring States[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 79–84.
- [3] 刘成禹, 何满潮. 古建筑风化石质构件力学参数的确定方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 474–480.
LIU Cheng-yu, HE Man-chao. Methods to obtain mechanical parameters of weathered rock constructional elements of ancient buildings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 474–480.
- [4] 张虎元, 严耿升, 赵天宇, 等. 土建筑遗址干湿耐久性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 347–355.
ZHANG Hu-yuan, YAN Geng-sheng, ZHAO Tian-yu, et al. Durability of earthen architecture ruins under cyclic wetting and drying[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 347–355.
- [5] 崔凯, 谌文武, 张景科, 等. 干旱区古代建材夯土特征及劣化机制研究[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2012, 44(6): 47–54.
CUI Kai, CHEN Wen-wu, ZHANG Jin-ke, et al. Study on mechanism of degradation and feature of ancient building materials-rammed earth in arid region[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2012, 44(6): 47–54.
- [6] 施维娟, 彭兴黔, 陈艳红. 土楼夯土墙体在自然环境下的侵蚀实测[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(1): 138–143.
SHI Wei-juan, PENG Xing-qian, CHEN Yan-hong. Erosion measurement of rammed earth wall in the wild[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2014, 23(1): 138–143.
- [7] 冯楠. 潮湿环境下砖石类文物风化机制与保护方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
FENG Nan. Study on deterioration mechanism and the conservation of typical brick and stone cultural heritage in moisture circumstances[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [8] XIAO YA, FU XUAN, GU HAIBING, et al. Properties, characterization, and decay of sticky rice–lime mortars from the Wugang Ming dynasty city wall (China)[J]. **Materials Characterization**, 2014, 90: 164–172.
- [9] MARTÍNEZ I, CASTILLO A, MARTÍNEZ E, et al. Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: the first step for a suitable intervention[J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 40: 352–360.
- [10] 谌文武, 毕骏, 沈云霞, 等. 修正 Van Genuchten 模型拟合干旱、半干旱地区遗址土颗粒分曲线的可靠性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 341–348.
CHEN Wen-wu, BI Jun, SHEN Yun-xia, et al. Reliability research on fitting particle size distribution curves of relic soils in arid and semi-arid regions by modified Van Genuchten model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 341–348.
- [11] PINEDA P, ROBADOR M D, PEREZ-RODRIGUEZ J L. Characterization and repair measures of the medieval building materials of a Hispanic–Islamic construction[J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 41: 612–633.
- [12] KYRIAKOS LABROPOULOS, ANTONIA MOROPOULOU. Ground penetrating radar investigation of the bell tower of the church of the Holy Sepulchre[J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 47: 689–700.
- [13] 张炜. 西安钟楼工程地质勘察报告[R]. 西安: 机械工业勘察设计院, 1985.
ZHANG Wei. Xi'an bell tower engineering geological investigation report[R]. Xi'an: Survey and Design Institute of Mechanical Industry, 1985.
- [14] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44: 892–898.
- [15] 宋令勇, 宋进喜, 张文静. 西安地区降水时空分布及变化规律分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 85–89.
SONG Ling-yong, SONG Jin-xi, ZHANG Wen-jing. Temporal and spatial distribution and long-term variation trend of precipitation in Xi'an[J]. **Journal of Arid Land Resources and Environment**, 2010, 24(1): 85–89.